

## BULONES “INTELIGENTES” (SMART BOLTS)

Ricardo Lain Huerta

### 1. Introducción.

A raíz del proyecto de investigación titulado “*Instrumentación geotécnica avanzada para detectar roturas de roca y monitorizar las cargas sobre el sostenimiento*”, cuyo título original en inglés es: “Advanced Geotechnical Instrumentation for Detecting Rock Failure and Monitoring Support Loads”, financiado en un 60% por la Comunidad Europea del Carbón y del Acero (CECA), su investigador principal, el profesor Ricardo Lain Huerta, con la colaboración del Ingeniero de Minas D. Antonio Gutierrez Abella, de la Oficina Técnica de Estudios y Control de Obras, OFITECO, ha patentado tres tipos de bulones que sirven para determinar en tiempo real la evolución de las convergencias, tensiones y deformaciones que se producen alrededor de cavidades subterráneas durante su etapa constructiva.

El objetivo general del proyecto ha consistido en investigar diversos métodos de instrumentación acoplados en bulones para medir, en tiempo real, las cargas que soportan dichos elementos de sostenimiento en cada momento.

Este objetivo general se ha desarrollado de acuerdo a los siguientes objetivos específicos:

1. Conocer la respuesta de los bulones sometidos a las tensiones inducidas por la perforación de una galería de una mina de carbón, mediante los denominados “smart bolts” o bulones inteligentes.
2. Obtener datos para los modelos numéricos y reproducir el estado tensodeformacional alrededor de la galería.
3. Comprender el comportamiento de los macizos rocosos en el área de influencia de una galería mediante los datos proporcionados por los bulones inteligentes en tiempo real.
4. Analizar la convergencia de una galería en el caso de un macizo rocoso elastoplástico.

Los dos pilares fundamentales en los que se basa el diseño del sistema de instrumentación y captación de datos a través de los sensores son los siguientes:

- Flexibilidad del diseño para un correcto acoplamiento de los sensores
- Estandarización del protocolo de comunicaciones para facilitar la lectura de la

información proporcionada por la instrumentación.

El primer punto ha requerido la elaboración de sensores para los bulones instrumentados. Estos bulones pueden variar en longitud, en número de manguitos por bulón y en tipo de instrumentación: cuerda vibrante, galgas extensométricas y fibra óptica. Su aplicación fundamental es la de sostenimiento del terreno, cimentaciones, muros de contención y estructuras subterráneas.

### 2. Antecedentes de la invención

En la actualidad, el control de cargas en bulones o anclajes se realiza fundamentalmente mediante las llamadas células huecas de carga, consistentes en un cilindro de acero instrumentado con elementos sensores, de diversa naturaleza y tecnología, medidores de deformaciones, que se instalan coaxialmente al bulón o anclaje justamente detrás de su cabeza de tensado, entre dos placas de reparto. Estas células son apretadas entre la cabeza del bulón o anclaje y la superficie del elemento o estructura a sostener, tanto en la fase inicial de tensado del bulón o anclaje como en la de posterior puesta en carga, midiendo la deformación axial a la que está sometido en cada momento. El paso o conversión de deformación a tensiones y cargas se realiza por aplicación de las fórmulas matemáticas de la Elástica teniendo en cuenta unas constantes propias de cada célula

Estos dispositivos son fiables y precisos, pero muestran diversas limitaciones y ciertos inconvenientes que impiden su aplicación generalizada a los diferentes casos que normalmente se presentan en su fundamental campo de aplicación, ya que:

- Son dispositivos exteriores al elemento o estructura a sostener, se instalan fuera del taladro de instalación del bulón o anclaje, entre dicho elemento o estructura y la cabeza de tensado del bulón o anclaje, ocupando un espacio que se traduce en un aumento de longitud de la parte exterior del bulón o anclaje, que no siempre es posible o, si lo es, complica y encarece los elementos de protección exterior de las cabezas.

- Miden exclusivamente la carga axial de los bulones o anclajes, sin dar información sobre esfuerzos, tensiones y cargas en otras direcciones (cortantes, etc).

- Su aplicación fundamental es en los bulones de anclaje puntual (anclaje en el extremo opuesto a la cabeza), midiendo en un punto próximo a la cabeza del mismo la carga a la que

está sometido en dicho punto, y tomándose dicho valor como el que presenta el bulón o anclaje en toda su longitud, ya que se supone que trabaja de forma semejante en toda ella, circunstancia que raramente es absolutamente cierta en la realidad. Este hecho es más significativo en los bulones de anclaje repartido (anclaje a lo largo de toda su longitud mediante inyección de cemento o resina), donde la información que suministra es de escasa relevancia, ya que exclusivamente se limita a la zona de la cabeza, mientras que el bulón o anclaje se encuentra trabajando de forma diferente a lo largo de toda su longitud.

- Sólo puede instalarse una célula en cada bulón o anclaje, y siempre en la zona de cabeza del mismo.

Con intención de obviar estas limitaciones e inconvenientes de las células huecas de carga para bulones o anclajes, se han realizado diversos estudios, experimentos y desarrollos de lo que podemos llamar bulones o anclajes instrumentados, consistentes en partir de un bulón o anclaje igual al requerido para el sostenimiento, e instrumentarlo en su propio cuerpo, con elementos sensores de diversa naturaleza y tecnología, en el punto de su longitud que se considere, protegiendo finalmente de forma conveniente dicha instrumentación.

Esta solución elimina las limitaciones e inconvenientes anteriormente descritos para las células huecas de carga para bulones o anclajes, pero presenta otras nuevas y propias, tales como:

- Obliga a trabajar con el bulón o anclaje entero, con toda su longitud, frecuentemente elevada, complicando y encareciendo enormemente los procesos de fabricación, almacenaje, transporte, manipulación e instalación del mismo.

- Carece de flexibilidad para ajustarse a modificaciones puntuales del diseño del proceso de control; cada bulón o anclaje instrumentado sólo sirve para el caso para el que fue fabricado.

- Aunque permite el control de cargas en otras direcciones distintas a la del eje del bulón o anclaje, en todos los casos la instalación de los elementos sensores requiere de una mecanización previa del bulón o anclaje, con la consiguiente pérdida de la sección resistente del mismo en dicho punto, produciendo un punto débil y alterando las características nominales del bulón o anclaje.

### 3. Descripción de la invención

El transductor de carga objeto de la invención carece de las limitaciones y de los inconvenientes anteriormente descritos, tanto para las células huecas de carga como para los llamados bulones o anclajes instrumentados, ya que:

- Se trata de un dispositivo de control que no se instala exteriormente al bulón o anclaje, sino intercalado en el mismo a modo de manguito de unión de dos partes cualesquiera del mismo, sin pérdida de sección resistente del bulón o anclaje en el punto de instalación, y con un mínimo aumento de sección (no resistente) del mismo en el punto de instalación, el justo y necesario para, por un lado, garantizar la unión a las partes cortadas del bulón o anclaje y, por otro, asegurar una eficaz protección del elemento sensor mediante una carcasa exterior.

- No es exclusiva su instalación en las proximidades de la cabeza, sino que puede instalarse en cualquier parte del bulón o anclaje. Además en el caso de instalarse próximo a la cabeza no conlleva un aumento de longitud de la parte exterior del bulón o anclaje, ya que puede introducirse en el taladro de instalación del mismo.

- Es posible la instalación múltiple de puntos de control a lo largo de su longitud, en las localizaciones que se desee, y además con una total flexibilidad para la modificación de dichas localizaciones.

- Permite el control de cargas en cualesquiera otras direcciones distintas a la del eje del bulón o anclaje; en todos los casos la instalación de los elementos sensores, por el proceso de mecanización requerido, no provoca una pérdida de la sección resistente del mismo en dicho punto, puesto que se parte de una sección mayor de la del bulón o anclaje, evitándose así puntos débiles y manteniendo inalteradas las características nominales del bulón o anclaje.

- Su aplicación es indiferente en los bulones de anclaje puntual y en los de anclaje repartido.

- Al tratarse fundamentalmente de un manguito de unión, no obliga a trabajar con el bulón o anclaje entero, con toda su longitud, facilitando y economizando los procesos de fabricación, almacenaje, transporte, manipulación e instalación del mismo, recalcando la ya mencionada flexibilidad de modificación de localizaciones.

#### 4. Tipos de sensores.

##### 4.1. Sensores de galgas extensométricas.

Los bulones inteligentes con manguitos de galgas extensométricas presentan en cada punto de medida una distribución de seis sensores que, con rangos de  $\pm 3.000$  microdeformaciones y con una precisión de  $\pm 1$  microdeformación, permiten, además de determinar el estado tensional tridimensional en dicho punto y el análisis de tensiones y deformaciones axiales, el estudio de esfuerzos cortantes y el análisis de las roturas por cortante (ver figura 1 y fotografía 1).

Con esta finalidad, se construyeron trece manguitos de galgas extensométricas, diez de los cuales se colocaron en secciones de medida diferentes en un túnel experimental de la Mina Escuela El Bierzo. Los tres manguitos restantes se ensayaron hasta rotura en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.

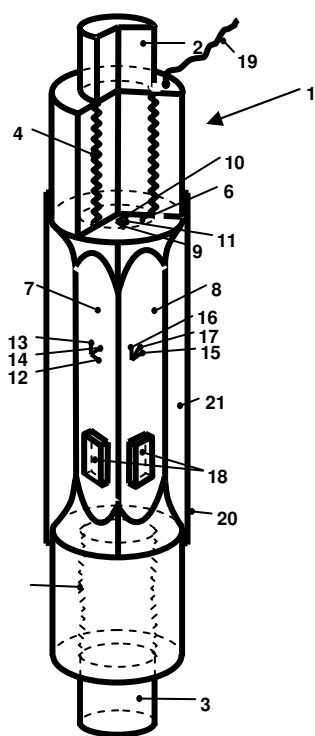
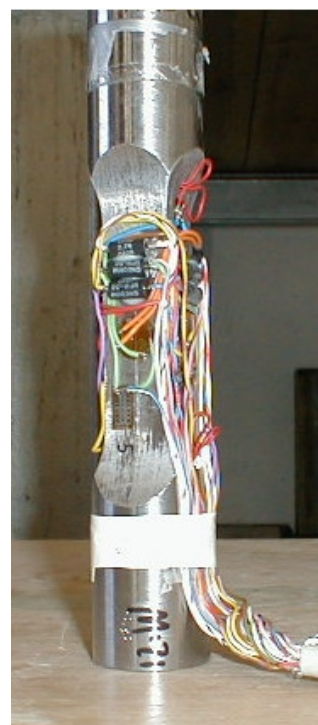


Figura 1. Sensor de galgas extensométricas

A continuación, se describe el transductor de carga de la Figura 1. Se trata de una variante roscada y con sensorización mediante bandas extensométricas en configuración tridimensional redundante, capaz de determinar el estado tridimensional de tensiones existentes en el bulón o anclaje en el punto de instalación.



Fotografía 1

El transductor está constituido por un manguito de acero unido en sus extremos a dos trozos de bulón o anclaje 2 y 3. Las uniones entre manguito y bulón son roscadas mediante las roscas 4 y 5.

En el cuerpo del manguito se han mecanizado tres planos de control 6, 7 y 8 formando un triédro, con un plano 6 transversal al manguito y, otros dos 7 y 8, paralelos al eje del mismo y ortogonales entre sí. La mecanización de estos planos se ha realizado, por un lado, sin provocar en ningún momento una pérdida de sección resistente en el manguito con respecto a la del bulón o anclaje y, por otro, con unas dimensiones y geometría de las transiciones que no produzcan alteración tensional en los puntos de control.

Sobre cada uno de estos planos se han instalado tres bandas extensométricas en tres direcciones estratégicas:

- En el plano 6, se controlan las direcciones 9, paralela al plano 7 (y coincidente con la 12 de dicho plano), 10, paralela al plano 8 (y coincidente con la 15 de dicho plano), y 11, bisectriz del ángulo formado por las dos anteriores.

- En el plano 7, se controlan las direcciones 12, paralela al plano 6 (y coincidente con la 9 de dicho plano), 13, paralela al eje del manguito

(y coincidente con la 16 del plano 8), y 14, bisectriz del ángulo formado por las dos anteriores.

- En el plano 8, se controlan las direcciones 15, paralela al plano 6 (y coincidente con la 10 de dicho plano), 16, paralela al eje del manguito (y coincidente con la 13 del plano 7), y 17, bisectriz del ángulo formado por las dos anteriores.

Así pues, se dispone de nueve bandas extensométricas activas en una configuración tridimensional redundante, pues se controlan seis direcciones básicas 11, 12, 13, 14, 15 y 17, y se repite el control de las tres fundamentales de las anteriores 9, 10 y 16. Esta configuración permite conocer el estado tridimensional de deformaciones, tensiones y cargas del manguito.

Para la lectura de cada una de las bandas activas antes mencionadas con una sensibilidad y precisión adecuada se utiliza la técnica de medida a cuatro hilos en configuración de puente completo, para lo cual se conecta cada una de ellas a un respectivo circuito electrónico 18 cuya misión es la de completar un puente de Weasthone compensado y equilibrado con cada una de las bandas activas.

La agrupación de los cuatro hilos conductores de lectura de cada banda activa forma un cable 19 que sale al exterior del manguito por uno de sus extremos.

Finalmente, la parte sensorizada del manguito se protege exteriormente con una carcasa metálica 20, inyectando con resina epoxídica el espacio 21 entre ella y el manguito.

Descrita suficientemente la naturaleza de la invención, así como la manera de realizarse en la práctica, debe hacerse constar que las disposiciones anteriormente indicadas y representadas en los dibujos adjuntos son susceptibles de modificaciones de detalle en cuanto no alteren el principio fundamental.

#### 4.2. Sensores de cuerda vibrante.

Debido a limitaciones constructivas de este método ( longitud mínima de las cuerdas), los sensores de cuerda vibrante presentan una configuración de galgas ( cuatro unidades) sin medidas transversales. Este sistema, además del tradicional análisis de la deformación axial y cargas axiales, permite el estudio de los esfuerzos de flexión en dos planos principales del bulón (ver Figura 2 y fotografía 2). Su lectura se realiza vía cable de pares metálicos utilizando la técnica

de medida de sensores de cuerda vibrante; todo el conjunto sensible se encuentra protegido exteriormente con una carcasa metálica, estando inyectado con resina epoxídica el espacio entre ella y el manguito.

De la misma manera que en los manguitos de galgas extensométricas, se construyeron trece manguitos de cuerda vibrante, diez de los cuales se montaron sobre bulones que posteriormente se colocaron en las secciones instrumentadas del túnel experimental de la Mina Escuela y los tres restantes se ensayaron hasta rotura en la prensa del Laboratorio de Mecánica de Rocas.

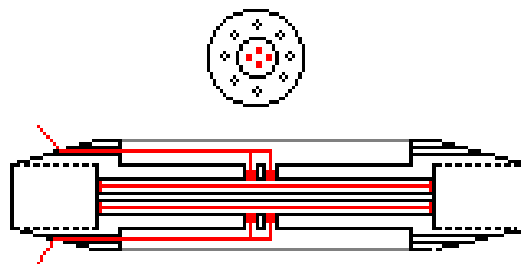
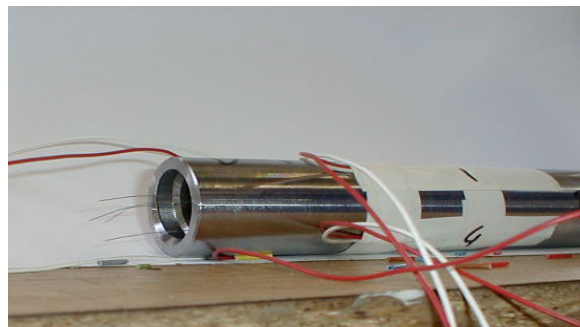


Figura 2. Sensor de cuerda vibrante



Fotografía 2

#### 4.3. Sensores de fibra óptica.

El principio de los sensores de fibra óptica radica en la utilización de elementos extensométricos ópticos basados en interferómetros del tipo Fabry-Perot, en los que la longitud de onda de la luz se modula según la longitud de la cavidad de Fabry-Perot. Con este método, se consiguen precisiones de 0,001 micras en la medida de la longitud de la cavidad, con una resolución del orden del 0,01 % a escala real. De esta forma, se pueden obtener rangos dinámicos de 84 dB con un sistema insensible a las posibles variaciones de la intensidad de luz debido a las conexiones o atenuaciones de la señal que se puedan producir a lo largo del cable.

En la Figura 3 se presenta un esquema de la solución mecánica dada para los manguitos instrumentados con extensómetros de fibra óptica. Se mecanizaron tres planos a  $120^\circ$  alrededor de cada manguito. Los sensores se colocaron sobre estos planos de la manera siguiente:

Tres sensores Fabry-Perot (FB) sobre el eje longitudinal de cada plano (fibras 1, 2 y 3).

Dos sensores FB más, uno sobre cada eje sobre los planos a  $45^\circ$ , a  $120^\circ$  y a  $240^\circ$  (torsión positiva y torsión negativa).

Por último, un sensor FB en el plano a  $0^\circ$ , perpendicular al eje longitudinal, definido por el tensor de tensiones.

Con este diseño se pueden registrar las deformaciones longitudinales de cada manguito, que son las más importantes y, mediante la composición de tres deformaciones, la curvatura de la pieza. Las tres fibras ópticas restantes registran los posibles movimientos de torsión ( $T+$  y  $T-$ ) y las deformaciones radiales (tangencial) que pueden afectar al manguito instrumentado.

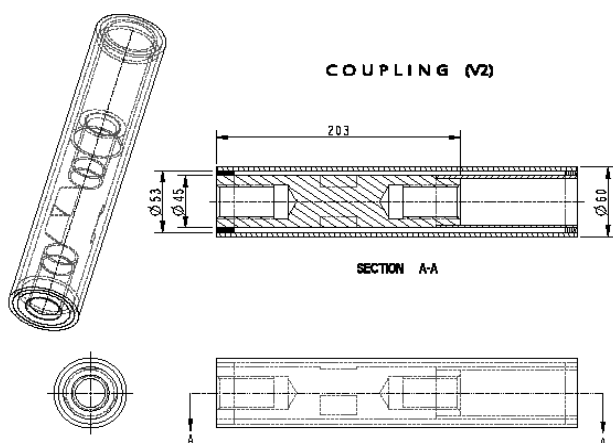


Figura 3. Sensor de fibra óptica

Al igual que en los sensores de galgas extensométricas y de cuerda vibrante, se construyeron 13 manguitos de fibra óptica, diez de los cuales se instalaron en los bulones que posteriormente se colocaron en las secciones instrumentadas del túnel experimental mencionado anteriormente. Los tres restantes se ensayaron en laboratorio hasta rotura, analizándose el tramo de comportamiento elástico de cada manguito.

## 5. Conclusiones y resultados

Los tres tipos de manguitos utilizados cubren sobradamente los objetivos planteados en el proyecto de investigación al que hace referencia este artículo, aunque los fundamentos de esta instrumentación son muy diferentes.

Los sensores de fibra óptica son muy precisos y presentan claras ventajas respecto a los otros sensores, aunque la mecanización de los manguitos es más complicada y el sistema es mucho más caro que el de cuerda vibrante o el de galgas extensométricas.

Dado que la atenuación de las señales a través de cable de fibra óptica es muy pequeña, la limitación en la longitud de las conexiones se encuentra para longitudes muy grandes, por lo que esta instrumentación es aplicable en minas profundas, donde el desarrollo de las galerías de conexión es muy grande.

Los bulones inteligentes o “smart bolts” con los manguitos y sus sensores se pueden utilizar en situaciones donde los estados tensionales son elevados, permitiendo el control de la situación en tiempo real, incluso desde lugares muy alejados de la obra.

Gracias a este proyecto, se ha demostrado la viabilidad y los buenos resultados que se pueden obtener utilizando los denominados “bulones inteligentes o *smart bolts*”, que permiten conocer en tiempo real la evolución de las convergencias, tensiones y deformaciones que se producen alrededor de un túnel durante su etapa constructiva.

Como resultado de la investigación, se han patentado tres tipos de bulones en la Oficina Española de Patentes y Marcas, recogidos en el expediente de Modelo de Utilidad Nº U200601658 presentado con fecha 12 de julio de 2006, cuya concesión se encuentra publicada en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial de fecha 1 de marzo de 2007.